

ГОДИШНИК НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“

ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФСКИ ФАКУЛТЕТ

Книга 2 – ГЕОГРАФИЯ

Том 113

ANNUAL OF SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”

FACULTI DE GEOLOGIE ET GEOGRAPHIE

Livre 2 – GEOGRAPHIE

Volume 113

УСТОЙЧИВОСТ И ПРЕДСКАЗУЕМОСТ НА РЕЧНИЯ ОТТОК НА РЕКА ДЕМЯНИЦА – БАНСКО

НЕЛИ ХРИСТОВА¹, ТАТЯНА ОРЕХОВА², ОЛГА НИЧЕВА³

¹ *Катедра по климатология, хидрология и геоморфология, СУ „Св. Климент Охридски“*

² *Институт за изследвания на климата, атмосферата и водите, БАН*

³ *Институт по механика, БАН*

Nelly Hristova, Tatjana Orehova, Olga Nicheva. STABILITY AND PREDICTABILITY OF THE STREAMFLOW OF DEMJANITSA RIVER AT BANSKO

Long time-series of streamflow data are important for the right evaluation of the seasonal fluctuations' sustain and for analyses of multi-annual periodicity. The aim of this work is to assess the long-term fluctuations and the predictability of the streamflow in a high-mountainous drainage basin over 65-year period from 1953–1954 to 2017–2018. The statistical tools and Colwell's indices were applied. The results showed a 23-year cycle (1981/82–2017/18) and a very good synchronous of the multi-year fluctuations between the annual and the spring streamflow in the watershed. The flow of the Demyanitsa River has high predictability ($P = 0,72$) by Colwell's index and confirms the results, received by other methods. Analysis of the historical streamflow data (1953–1954 to 2017–2018) of the Demyanitsa River indicates a stable of the seasonal and multi-annual fluctuations of the streamflow.

Kew words: annual streamflow, river regime, predictability, Colwell index, high mountainous river basin.

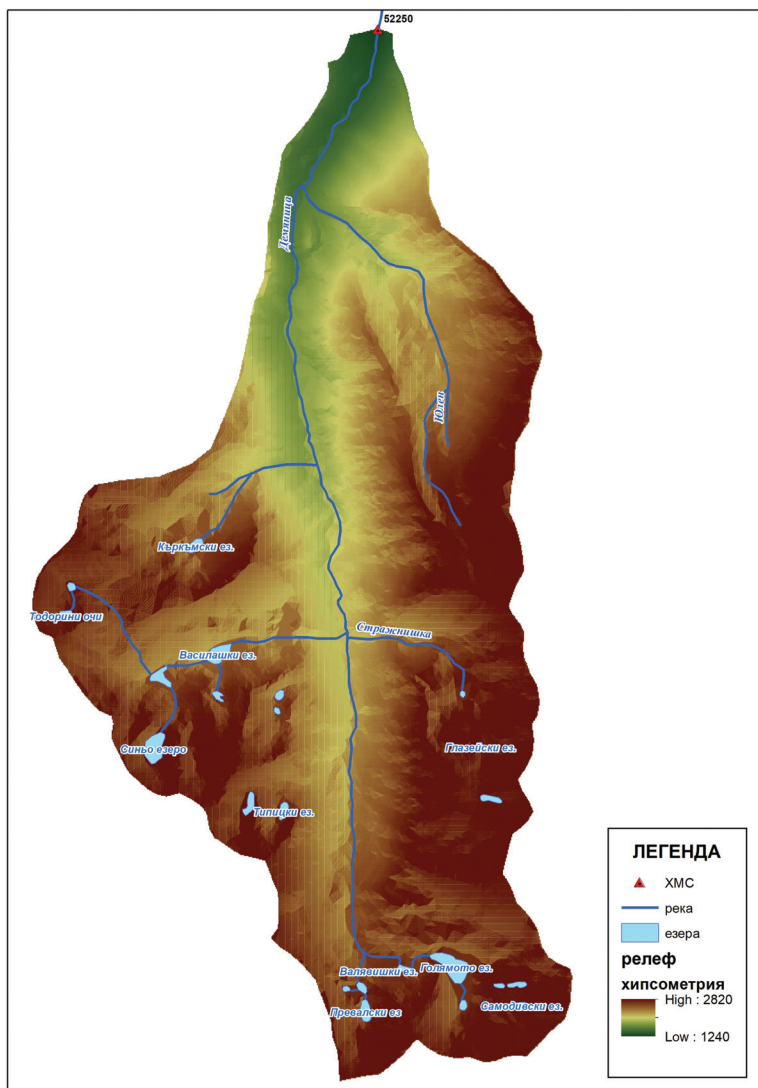
УВОД

Увеличаването на дължината на времевите редове от хидрометрични наблюдения дава възможност за изработване на по-точни прогнози и модели на хидроложките процеси, за получаване на по-достоверни резултати за многогодишните отточни колебания и за сравняване на настъпили изменения в речните водосбори. Наред с посочените вектори на анализиране на речния отток интерес в теоретичната хидрология продължава да е получаването на сведения за постоянството/непостоянството на хидроложки събития в пространствено-времеви аспект. Установяването на степента на повторемост през всяка хидроложка година в едни и същи срокове на високи и на ниски води и на сезонност в отточната динамика предполага вземането на по-точни решения в управлението на водите за различни цели. Успоредно със статическите и вероятностните методи, чрез които се изследват периодичността и повторемостта на времевите параметри на хидроложките процеси, приложение за установяването им намира индексът на Colwell (1974) за предсказуемост – P , с компонентите си постоянство – C (мярка за времева инвариантност), и непредвидимост – M (мярка за периодичност). Индексът предоставя количествено измерими оценки на вероятността дадена величина да се запази на определено ниво в годишен и многогодишен план. Индексът на Colwell, основан на теория на информацията, е аналогичен на автокорелационния анализ и на някои аспекти на хармоничния анализ (Colwell 1974; Mohammed et al. 2015) и дава количествена оценка на вероятността дадено събитие да се запази на определено ниво в годишен и многогодишен план. Индексът на Colwell е използван в хидроложки изследвания за установяване на влиянието на наводненията върху биоразнообразието (Poff & Ward 1989), за периодичността на речния отток и на валежите (Gan et al. 1991), за сезонността в отточния режим (Milhous 2012; Ehasaniet al. 2015; Walega & Młynski 2016; Walega & Młynski 2017) и в базисния отток (Stoelzle et al. 2020), за класификация на регулиран речен отток (Webb et al. 2012; Zhang et al. 2012, Jiang et al. 2016). Ефективността на индекса на Colwell е тествана в сравнение със спектралния анализ (Stearns 1981; Beissinger & Gibbs 1993) и с анализа на Фурие (Sabo & Post 2008), прилагани за изследване на периодичността и на сезонността на различни природни процеси. Посочените анализи установяват информативност на индекса за предсказуемостта на явления, които зависят от климатичната периодичност, каквито са и хидроложките процеси. Индексът за предсказуемост на Colwell (1974) не е прилаган досега в хидроложките и хидроеколожки изследвания за територията на страната.

Целта на настоящото изследване е да анализира отточния режим и предсказуемостта на речния отток чрез индекса на Colwell в речния басейн на р. Демяница – Банско и да предостави количествено измерими представи за променливостта на водните обеми за различни времеви периоди с тази, получена по традиционните методи.

МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Териториален обхват. Настоящото изследване е реализирано за р. Демяница – Банско с площ на речния басейн 35,7 km² и със средна надморска височина 2195 m. Водосборният басейн е развит в североизточния склон на Пирин планина, ориентиран в посока север, с вододелна линия, която преобладаващо следи планински била с надморска височина над 2400 m (фиг. 1).



Фиг. 1. Природно-географска схема на речния басейн на р. Демяница – Банско
Fig. 1. Map of the catchment area of the Demyanitsa River at Bansko

Изворната област на р. Демяница е над 2000 m и се състои от малки водни потоци, започващи течението си от няколко езерни групи. Езера дават началото и на реките Василашка, Газейска и Къркъмска – първоразрядни притоци на р. Демяница. Езерното и снежно-дъждовното подхранване в горното течение на реката предпоставят устойчивост на отточните фази и сходство на хидрографа през годините (Панайотов 1966, 1972) и обуславят високопланински речен режим (Христова 2004; Hristova 2011) с асиметрични високи вълни (Христова 2007).

Исходна информация. Изборът на речния водосбор е предпоставен от наличието на хидрометрична информация за месечния отток за периода 1953/1954–2017/2018, получена от Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ) по проект към СУ „Св. Климент Охридски“. Продължителността на изчислителния период е 65 години.

Методи на изследване. Времевите редове от стойности на годишния и сезонния речен отток, както и на редовете от водни обеми през пълноводието и маловодието се изследват за хомогенност. Типът разпределение е анализиран чрез непараметричните тестове на Колмогоров–Смирнов (Kolmogorov–Smirnov, с ниво на значимост по Lilliefors) и на Шапиро–Уилк (Shapiro–Wilk), и чрез Q-Q (Quantile-Quantile) плот за крайните стойности (outliers) – наличие или отсъствие на крайни (необичайни) стойности (Helsel & Hirsch 2002). Отклоненията на годишния отток от средната многогодишна стойност се нормират по израза $(Q_i - Q_{cp})/\sigma$, в който Q_i е годишен речен отток, Q_{cp} – средно многогодишна стойност на речния отток, чрез σ – стандартно отклонение. Многогодишната отточна динамика се анализира чрез кривата на интегралните разлики (с ордината $\sum(K-1)/C_v$, където $K = Q_i/Q_{cp}$, C_v – коефициент на вариация). Всички изчисления се извършват за хидроложка година.

Сравняването на средните стойности на годишния отток за различни по продължителност времеви интервали се реализира чрез t -разпределение при двустранен критерий с ниво на значимост $\alpha = 0,05$.

Продължителността на многоводните и маловодните отточни фази е определена в месеци чрез съотнасяне на месечния отток към средната годишна стойност на речния отток. За пълноводие е приет периодът с водни количества на средногодишния отток, а за маловодие – периодът с водни количества под средногодишния отток.

Предсказуемостта по Colwell – P , се изчислява по израза:

$$P = 1 - \frac{H(XY) - H(Y)}{\log s},$$

където

$$H(X) = - \sum_j \frac{X_j}{Z} \log \frac{X_j}{Z}$$

$$H(Y) = - \sum_j \frac{Y_j}{Z} \log \frac{Y_j}{Z}$$

$$H(XY) = - \sum_i \sum_j \frac{N_{ij}}{Z} \log \frac{N_{ij}}{Z}$$

Индексът на постоянство C описва тенденцията променлива да остане непроменена за даден период от време и се определя по изрази:

$$C = 1 - \frac{H(Y)}{\log(s)}$$

Индексът на непредвидимост – M се определя по формулата:

$$M = \frac{H(X) + H(Y) - H(XY)}{\log(s)}$$

Комбинирайки различията в състоянието и времето, общата предсказуемост се изчислява като

$$P = C + M$$

Стойностите и на трите индекса варират от 0 (напълно непредсказуема величина) до 1 (напълно предвидима величина). Индексът на постоянство (C) приема максималната стойност ($C = 1$), ако анализиранията променлива има една и съща стойност за всички изследвани периоди. Индексът на непредвидимост (M) приема максималната стойност ($M = 1$), когато стойността на променливата е различна в последователни стъпки от време, но появата на дадена стойност е предвидима. Максималната предсказуемост възниква, когато състоянието на дадено явление се знае с абсолютна сигурност във времето. При P над 50% редовността в появата на събитието е над средното ниво, а P под 50% – под средното ниво. Когато M представлява най-малко 50% от предсказуемостта, сезонността е устойчива и се проявява всяка година; когато M е по-малка от 50%, сезонността се проявява периодично (Colwell 1974). Важна особеност при изчисляване на индекса е определянето на броя на класовите интервали.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИИ

Речен отток. Средният многогодишен речен отток на р. Демяница – Банско за периода 1954/55–2017/18 е $1,55 \pm 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, между $0,99 \text{ m}^3/\text{s}$ (1984–1985 и 2000/2001) и $2,67 \text{ m}^3/\text{s}$ (1962–1963) (табл. 1). Емпиричното разпределение на

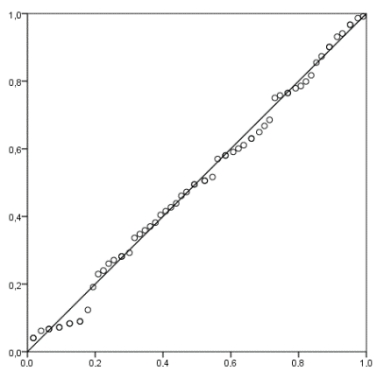
годишните водни обеми дава следната информация: речният отток с обезпеченост 5% е $2,19 \text{ m}^3/\text{s}$, с обезпеченост 50% – $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$, с обезпеченост 75% – $1,29 \text{ m}^3/\text{s}$, с обезпеченост 95% – $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$. Екстремните стойности на годишния отток са представени в приложението към публикацията.

Таблица 1
Table 1

Статистически параметри на годишния и сезонния речен отток
Statistics of seasonal and annual streamflow

Период		Q_{cp} (m^3/s)	σ	As	Ex	Q_{max} (m^3/s)	Q_{min} (m^3/s)	Cv
Година		1,55	0,37	0,64	0,80	0,99	2,67	0,24
Хидролож- ки сезон	Зима (XI–II)	0,72	1,36	0,69	0,93	0,94	6,88	0,47
	Пролет (III–VI)	2,87	2,86	0,64	0,77	6,43	19,77	0,25
	Лято-есен (VII–X)	1,04	1,53	0,31	0,60	1,80	8,96	0,37

Коефициентът на вариация (Cv) – 0,24, свидетелства за приблизителна еднородност на времевия ред от годишни стойности на речния отток, което се потвърждава и от двойносумарната крива. Коефициентите на асиметрия (As) и на ексцес (Ex) са по-големи от критичните нива на значимост $\alpha = 0,05$, което свидетелства за разпределение, различно от нормалното. Сходен е резултатът от статистическия тест на Шапиро–Уилк: p -стойността е 0,007, или по-малка от 0,05, за разлика от статистическия тест на Колмогоров–Смирнов, показващ нормално разпределение на времевия ред от годишни стойности на речния отток (p -стойността е 0,20, или по-голяма от 0,05). Изследването на разпределението на времевия ред от годишен речен отток чрез Q-Q плот графиката потвърждава резултата от теста на Шапиро–Уилк. Правата линия се изравнява най-добре от логнормалното разпределение (фиг. 2).



Фиг. 2. Q-Q плот диаграма на годишния речен отток на р. Демяница – Банско
Fig. 2. Q-Q plot of annual streamflow of the Demyanitsa River at Bansko

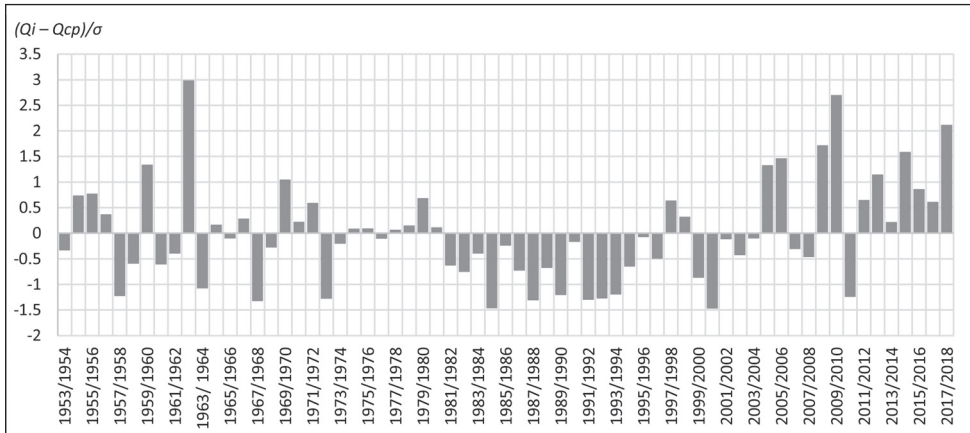
Сравнителният анализ на средногодишния отток за различни изчислителни периоди с продължителност 30 години (препоръчителна дължина на времевите редици за определяне на нормата на речния отток) не показва статистически значими разлики между средно многогодишните стойности за периодите 1945/46–1974/75 и 1975/76–2004/05, 1945/46–1974/75 и 1985/76–2004/05, 1975/76–2004/05 и 1985/76–2014/15. t_{stat} е по-голяма от критичната стойност при двустранен критерий при първите две двойки изследвани изчислителни периоди и по-малка от критичната стойност за 1975/76–2004/05 и 1985/76–2014/15 (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Резултати на t -тест за разлика между средни стойности
Results of the t -test paired two sample means

Сравнявани периоди	t -stat	t крит. при двустранен критерий
1945/46–1974/75 и 1975/76–2004/05	2,556	2,04
1945/46–1974/75 и 1985/76–2004/05	2,965	2,04
1975/76–2004/05 и 1985/76–2014/15	0,468	2,04

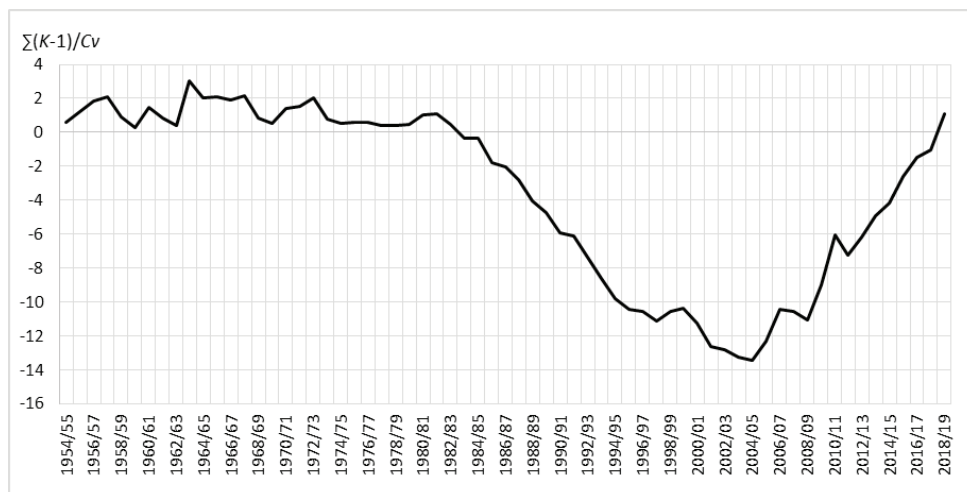
Нормираните отклонения на годишния речен отток на р. Демяница – Банско за 1954/55–2017/18 очертават продължителен маловоден период от 1981–1982 до 2003–2004 (с изключение на 1997–1998 и 1998–1999), тенденция за увеличаване на годишните водни обеми след 2004–2005 и разнопосочна динамика през останалите години от изследвания период (фиг. 3).



Фиг. 3. Нормирани отклонения на годишния отток на р. Демяница – Банско за периода 1954/55–2017/18

Fig. 3. Standardized values of the annual streamflow of the Demyanitsa River at Bansko

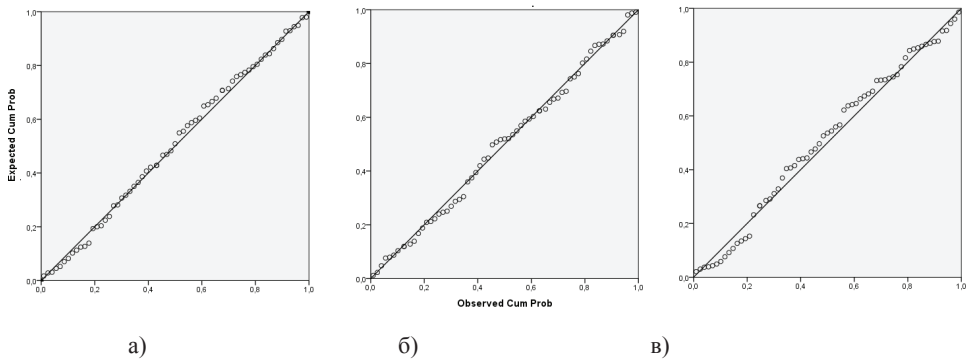
Установените особености на многогодишната отточна динамика се доказват и от кривата на интегралните разлики, в която се открива един продължителен 39-годишен хидроложки цикъл с 23-годишен маловоден период (1981/82–2003/04), последван от многоводна фаза (2005/06–2017/18) (фиг. 4).



Фиг. 4. Крива на интегралните разлики на годишния отток на р. Демяница – Банско
 Fig. 4. Curve $\Sigma(K-1)/C_v$ of the annual streamflow of the Demyanitza River at Bansko

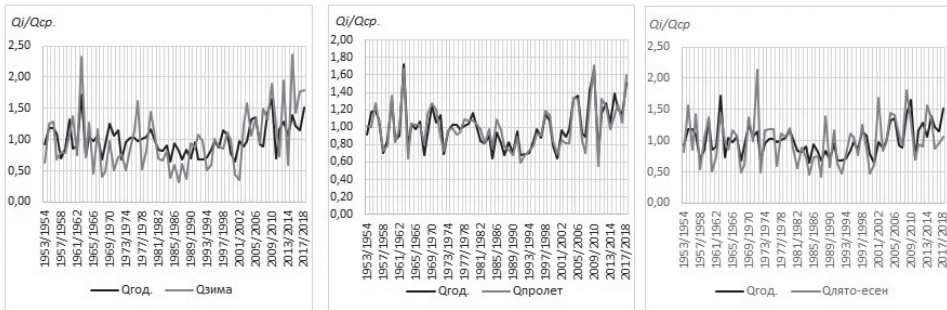
През продължителния 23-годишен период с речен отток под нормата се отчита най-маловодната година – 2000–2001, подобно на повечето речни басейни в страната (Христова & Иванова 2018). Годишният отток през 2000–2001 г. е $0,99 \text{ m}^3/\text{s}$, почти еднакъв с годишния речен отток през 1967–1968 г., когато е $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$. Сходни са стойностите и на най-многоводните години – 1962–1963 и 2009–2010 с речен отток $2,67$ и $2,56 \text{ m}^3/\text{s}$ съответно. Посочените гранични стойности на годишния отток не удостоверяват тенденции за увеличаване/ намаление на валежите в речния басейн за изследвания период.

В сезонното разпределение на речния отток на р. Демяница – Банско доминира пролетният хидроложки сезон (март–юни) с речен отток, който съставлява средно $62,2\%$ от годишния обем и през който водните количества варират в тесни граници – коефициентът на вариация е $0,25$ (табл. 1). Най-маловоден и най-изменчив е зимният хидроложки сезон със средномесечен речен отток $0,72 \text{ m}^3/\text{s}$ ($15,4\%$ от годишния воден обем) и $C_v = 0,47$. Отношението между водните обеми през зимния и през пролетния хидроложки сезон е $0,26$. Средният многогодишен речен отток през юли–октомври формира $22,4\%$ от годишния воден обем, с коефициент на вариация $0,37$ (табл. 1). При тестване на времевите редове от сезонен отток за типа разпределение чрез Q-Q плот диаграмите най-добро изравняване на правата линия се получава при логнормално разпределение (фиг. 5).



Фиг. 5. Q-Q плот диаграми на сезонния речен отток на р. Демяница – Банско:
 а) зима; б) пролет; в) лято–есен
 Fig. 5. Q-Q plots of seasonal streamflow of the Demyanitsa River at Bansko:
 а) winter; б) spring; в) summer–autumn

Многогодишните колебания на сезонния отток са синхронни с тези на годишния отток, при най-голямо сходство в конфигурацията на хронологичния ход между годишния и пролетния речен отток и най-малко – между годишния и зимния сезонен отток (фиг. 6).



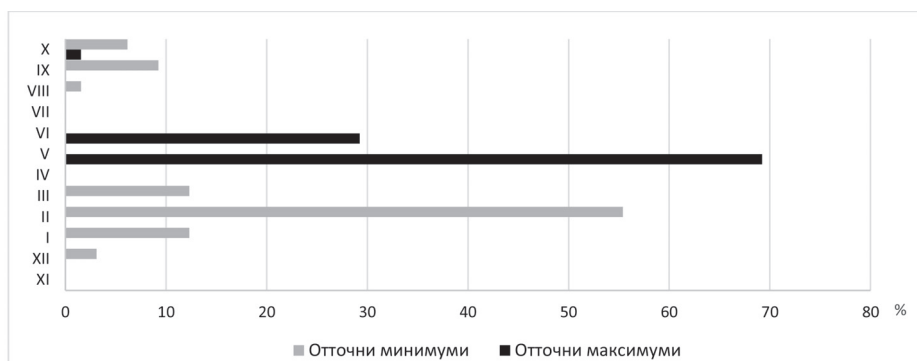
Фиг. 6. Хронологичен ход на годишния и сезонния речен отток на р. Демяница – Банско
 Fig. 6. Course of annual and seasonal streamflow of the Demyanitsa River at Bansko

Месечното разпределение на речния отток е с отточни максимуми през м. май и м. ноември и с отточни минимуми през м. февруари и м. октомври (табл. 2). Максималните месечни водни количества през м. май и м. юни варират в сравнително тесни граници, което се доказва от коефициентите на вариация: $C_v = 0,25$ за м. май и $C_v = 0,29$ за м. юни – стойности, близки до тези на годишния речен отток (табл. 3).

Статистически параметри на месечния речен отток
Statistics of monthly streamflow

Статистически параметър	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Q_{min} (m ³ /s)	0,25	0,20	0,21	0,22	0,24	0,47	1,92	1,85	0,69	0,42	0,30	0,27
Q_{av} (m ³ /s)	1,07	0,74	0,56	0,51	0,6	1,66	5,01	4,21	1,67	0,87	0,71	0,92
Q_{max} (m ³ /s)	4,66	2,81	1,61	1,93	2,09	4,94	8,37	11,1	4,22	2,20	2,53	4,07
σ	0,74	0,42	0,29	0,32	0,37	0,91	1,47	1,57	0,71	0,38	0,39	0,71
C_v	0,69	0,57	0,51	0,62	0,62	0,55	0,29	0,37	0,42	0,44	0,56	0,77

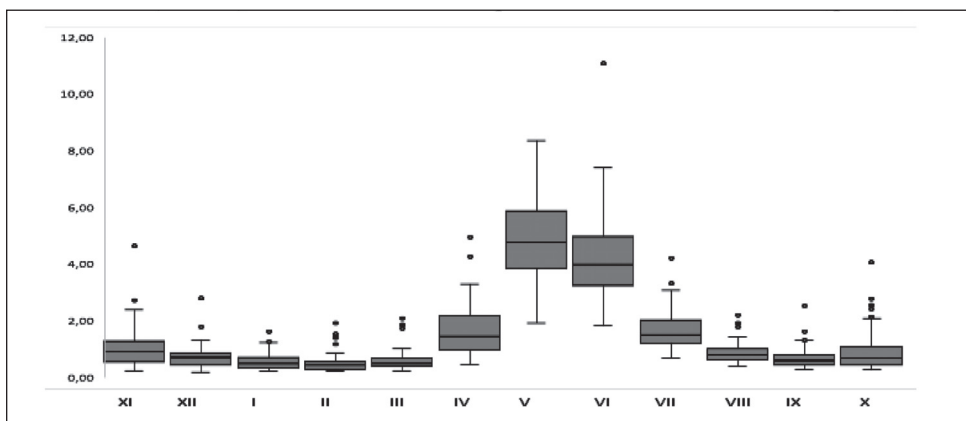
Към особеностите на вътрешногодишния ход на речния отток се отнася изключителната устойчивост на времевата проява на максималните месечни водни обеми през пролетния хидроложки сезон и съсредоточаване на отточните минимума преобладаващо през м. февруари (фиг. 7).



Фиг. 7. Честота (%) на отточните максимуми и отточните минимума на р. Демяница – Банско за периода 1954/1955–2017/2018

Fig. 7. Frequency of monthly maxima and minima of the streamflow of the Demyanitsa River at Bansko

Диаграмите boxplot (Box–Whiskers) на времевите редове от месечни стойности показват асиметрично разпределение за всички месеци и крайни (нетипични) стойности (outliers) за всеки месечен интервал, с изключение на м. май (фиг. 8).



Фиг. 8. Boxplot диаграми на месечния отток на р. Демяница – Банско
 Fig. 8. Boxplot diagrams of monthly streamflow of the Demyanitsa River at Bansko

Крайните (нетипичните) стойности (outliers) (по междуквартилни разстояния – $IQR = q_3 - q_1$) в почти всички случаи се явяват умерено крайни (moderate outliers), т.е. разположени в областта $q_1 - 3 IQR$ (външни долни граници на boxplot диаграмата) и $q_1 - 1,5 IQR$ (вътрешна долна граница). Екстремни крайни стойности (extreme outliers), които се намират извън външните граници или под $q_1 - 3 IQR$ или над $q_3 + 1,5 IQR$, по един случай се регистрират през месеците ноември ($4,66 \text{ m}^3/\text{s} - 1962/63$), декември ($2,81 \text{ m}^3/\text{s} - 2017/18$), юни ($11,1 \text{ m}^3/\text{s} - 1962/63$), септември ($2,53 \text{ m}^3/\text{s} - 1971/72$) и октомври ($4,07 \text{ m}^3/\text{s} - 1971/72$), по три случая – през м. февруари ($1,41 \text{ m}^3/\text{s} - 2009/10$, $1,54 \text{ m}^3/\text{s} - 2012/13$ и $1,93 \text{ m}^3/\text{s} - 2014/15$), и по четири случая – през м. март ($1,75 \text{ m}^3/\text{s} - 2009/10$, $1,82 \text{ m}^3/\text{s} - 2014/15$, $1,88 \text{ m}^3/\text{s} - 2015/16$ и $2,09 \text{ m}^3/\text{s} - 2008/2009$).

Пълноводната отточна фаза се проявява всяка година през пролетния хидроложки сезон, с продължителност от два до четири месеца, с най-голяма честота на времетраене три месеца: май–юли – 30,8% от всички случаи за изследвания период, и април–юни – 27,7% от всички пълноводни отточни фази. Пълноводие с продължителност четири месеца се регистрира в 23,1% от случаите, но най-често е от април до юли включително (18,5% от всички пълноводни отточни фази). Пълноводие с продължителност два месеца през всички изследвани години се проявява през май–юни и съставлява 18,5% от пълноводните състояния на речния отток на р. Демяница – Банско. Повишения на оттока над средногодишната стойност извън пролетните месеци се установяват през ноември (21,5% от случаите), но не през всяка хидроложка година. Епизодични са случаите с водни обеми над средногодишния отток през м. октомври (1963/64, 1971/72, 2001/02, 2013/14, 2014/15). Сумарният средно многогодишен речен отток през пълноводието е $11,97 \pm 0,40 \text{ m}^3/\text{s}$, меж-

ду 6,60 m³/s (2010/2011) и 21,74 m³/s (1962/1963) за периода 1954/55–2017/18 (табл. 3) и съставлява 64,5% (между 51,1% и 79,5%) от годишния речен отток.

Таблица 4
Table 4

Статистически параметри на отточните фази на р. Демяница – Банско
Statistics of high and low stream flow of the Demyanitsa River at Bansko

Отточна фаза	Q_{cp} (m ³ /s)	σ	As	Ex	Q_{max} (m ³ /s)	Q_{min} (m ³ /s)	Cv
Пълноводие	11,97	3,25	0,71	0,49	21,74	6,60	0,27
Маловодие	6,56	2,05	0,53	0,08	11,99	3,33	0,30

За разлика от пълноводната отточна фаза, маловодието е продължително, с начало през лятно-есенния хидроложки сезон – най-често през август, и край през първия месец от пролетния хидроложки сезон – м. март. Средният сумарен отток през маловодната отточна фаза е $11,97 \pm 0,25$ m³/s и варира от 3,33 m³/s (1984–1985) до 6,60 m³/s (2014–2015) (табл. 4). Времеви редове от водни обеми през пълноводието и маловодието, подобно на годишния и на сезонния речен отток, се подчиняват на логнормалното разпределение.

Анализът на годишния отток и на отточния режим на р. Демяница – Банско потвърждава получени досега резултати за някои хидроложки показатели. Средната многогодишна стойност – 1,55 m³/s за 1954/55–2017/18, е между стойностите, получени за периодите 1935/36–1974/75 (1,51 m³/s) и 1950/51–1974/75 (1,59 m³/s) (Хидрологичен справочник..., 1982). Времевият ред от годишни стойности на речния отток запазва вариабилността си за изследвания период спрямо цитираните по-горе, през които е съответно 0,27 и 0,24. В многогодишните отточни колебания във водосбора на р. Демяница се отчита продължителен 23-годишен период с речен отток под нормата, през който се отчита и най-маловодната година – 2000–2001, подобно на повечето речни басейни в страната (Христова & Иванова 2018). Граничните стойности на годишния речен отток за най-многоводната и най-маловодната хидроложка година се запазват при различните изчислителни периоди и удостоверяват постоянство на природния оттокообразуващ комплекс. Логнормално разпределение на времеви ред от годишни стойности на речния отток съответства на резултатите, получени от Николова и др. (1975). Сезонното разпределение на речния отток е типично за високопланински речни басейни – с най-висок дял на водните обеми през пролетния хидроложки сезон (Панайотов 1972; Стойчев 1977). Отношението между водните обеми през зимния и пролетния хидроложки сезон – 0,26, е със стойност, сходна с получената от Панайотов (1972) – 0,28, за двадесетгодишен период на изследване и свидетелства за устойчивост на сезонната отточна динамика. Получените резултати за вътрешногодишното разпределение на речния отток за 1954/1955–2017/2018 г. оформят конфигу-

рация на месечния хидрограф, идентична с тази за периоди с продължителност 20 или 30 години, и е важен признак за постоянство в месечната ритмика на природните процеси в речния водосбор. Месечният отток има асиметрично разпределение, с малко на брой стойности извън основния диапазон през месеците май и юни, с по-широк диапазон на вариране и с по-големи отклонения от нормалното разпределение през останалите месеци от годината – отражение на голямата вариабилност (табл. 3). Пълноводието всяка година се регистрира през май–юли или април–юни, а пролетният хидроложки сезон – с продължителност от два до четири месеца, с най-голяма честота на времетраене три месеца: май–юли – 30,8% от всички случаи за изследвания период.

Индекси на Colwell. Предсказуемостта на речния отток, определена по индекса на Colwell, е изчислена за сезонния и месечния отток, за водните обеми през пълноводната и маловодната отточна фаза за 8-, 10-, 12-, 14- и 16-класови интервали.

Получените резултати за месечния речен отток на р. Демяница – Банско показват предсказуемост над 50% (при 8-, 10- и 12-класови интервали) или висока предвидимост на месечните водни обеми (табл. 4). Стойностите на P за матрицата от месечни стойности на речния отток варират между 0,50 (при 16-класов интервал) и 0,72 (при 8-класов интервал). Високата предсказуемост е предпоставена от малките стойности на индекса на непредвидимост (M), които варират между 0,15 (при 16-класов интервал) и 0,22 (при 8-класов интервал), и близките до 50% стойности на индекса на постоянство (C) (табл. 5).

Таблица 5
Table 5

Индекси на Colwell за различен брой класове
Colwell indices for different number classes

Речен отток	Класови интервали	Индекси на Colwell				
		Непредвидимост (M)	Постоянство (C)	Прогнозируемост (P)	C/P	M/P
$Q_{\text{мес.}}$	8	0,226	0,491	0,717	0,69	0,32
	10	0,213	0,447	0,661	0,68	0,32
	12	0,198	0,415	0,613	0,68	0,32
	14	0,169	0,376	0,546	0,68	0,31
	16	0,148	0,351	0,499	0,71	0,29
$Q_{\text{сез.}}$	8	0,325	0,145	0,470	0,31	0,69
	10	0,295	0,151	0,445	0,34	0,66
	12	0,266	0,155	0,421	0,37	0,63
	14	0,229	0,143	0,372	0,38	0,62
	16	0,203	0,141	0,344	0,41	0,59

Прогнозируемостта (P) на сезонния речен отток на р. Демяница – Банско е под 50%, P варира от 0,34 (при 16-класов интервал) до 0,47 (при 8-класов интервал) поради по-голямата непредвидимост на сезонните водни обеми – M е меж-

ду 0,20 (при 16-класов интервал) и 0,32 (при 8-класов интервал) и на малкото им постоянство – C е в границите 0,14–0,15 (табл. 5). Стойностите на P намаляват с увеличаване на продължителността на класовия интервал, резултат, получен и в предходни изследвания (Gan et al. 1991; Milhous 2012; Walega & Młynski 2017).

Стойностите на P , получени за матрицата от месечен речен отток със стойности в определени граници, потвърждават извода на Панайотов (1966) за голяма устойчивост на вътрешногодишното разпределение на водните количества – коефициентът на устойчивост, въведен от автора, е 0,24, или много близък до долната теоретична граница 0, която свидетелства за пълно съвпадение в разпределението на речния отток през годините.

ИЗВОДИ

Годишният речен отток, многогодишната и вътрешногодишната отточна динамика в речни басейни със средна надморска височина над 2000 m (без антропогенни въздействия), развити в източните склонове на Пирин планина, дават основание за следните изводи. Хидроложките процеси протичат в еднакви гранични стойности на отточните характеристики за различни изчислителни периоди и удостоверяват устойчивост на оттокообразуващите фактори и условия за периода 1953/54–2017/18. Речният отток на р. Демяница – Банско може да послужи за индикатор за многогодишната отточна динамика във високопланинските територии на страната. Индексът на предсказуемост, предложен от Colwell, осигурява интерпретируема количествена оценка за стохастичност и цикличност и допълва традиционните методи за анализ на устойчивостта на сезонното разпределение на речния отток. Получените резултати за предсказуемостта (в качеството на описание на променливостта през определена времева рамка) на речния отток на р. Демяница – Банско могат да бъдат включени в регионалните оценки на природната среда във високопланинските речни водосбори.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-322/18.12.2019).

Хидрометрична информация за месечния отток на р. Демяница – Банско за периода 1953/1954–2017/2018 е закупена от Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ) по проект 80-10-163/16.04.2019 – Динамика на месечния и годишния речен отток във високопланинските райони на България (на примера на р. Дамяница) към ФНИ, СУ „Св. Климент Охридски“.

ЛИТЕРАТУРА

- Николова, Н., К. Моралиева, В. Страхилова и др. 1975. Математическо описание на колебанията на годишните стойности на оттока в НРБ. – *Водни проблеми*, 1, 10–32.
- Панайотов, Т. 1966. Устойчивост на вътрешногодишното разпределение на оттока. – *Хидрология и метеорология*, 4, 21–26.
- Панайотов, Т. 1972. Изменчивост на вътрешногодишното разпределение на оттока, хидроложки фази и хидроложки сезони. – *Изв. ИХМ*, XX, 59–80.
- Стойчев, К. 1977. Генезис и сезонно разпределение на речния отток в Рила планина. – *Год. на СУ*, ГГФ, т. 70, кн. 2 – География, 89–135.
- Хидрологичен справочник на реките в България. София, ГУХМ при БАН, 1982.
- Христова, Н., Е. Иванова. 2018. Оценка и географско разпределение на речния отток през 2000–2001 г. – *Год. на СУ*, ГГФ, т. 110, кн. 2 – География, 39–51.
- Христова, Н. 2004. Типизация на отточния режим в България. – *Год. на СУ*, ГГФ, т. 96, кн. 2 – География, 129–153.
- Христова, Н. 2007. Параметри на високите вълни във високопланинските поречия. – *Год. на СУ*, ГГФ, т. 99, кн. 2 – География, 71–86.
- Beissinger, S. R., J. P. Gibbs. 1993. Are variable environments stochastic? A review of methods to quantify environmental predictability. *Adaptation in Stochastic environments*. J. Yoshimura and C.W. Clark (eds). Berlin: Springer-Verlag, 132–146.
- Colwell, R. K. 1974. Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. – *Ecology* 55(5): 1148–1153.
- Ehasani, N., B. M. Fekete, C. J. Vorosmarty et al. 2016. A neural network-based general reservoir operation scheme. – *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30, 1151–1166.
- Gan, K. C., T. A. McMahon, B. L. Finlayson. 1991. Analysis of periodicity in streamflow and rainfall data by Colwell's indices. – *Journal of Hydrology* 123(1–2), 105–118.
- Helsel, D. R., R. M. Hirsch. 2002. Statistical methods in water resources. *Techniques of Water Resources Investigations*, Book 4, chapter A3. U.S. Geological Survey.
- Hristova, N. 2011. Hydrological regime in Bulgaria according to the monthly maxima and minima of runoff. – In: Fourth International Scientific Conference “Water – problems and solutions”, FMNS–2011, 08–11.06.2011, Blagoevgrad.
- Jiang, M., B. D. Felzer, D. Sahagian. 2016. Predictability of Precipitation Over the Conterminous U.S. Based on the CMIP5 Multi-Model Ensemble. – *Sci Rep* 6, 29962 (2016), <https://doi.org/10.1038/srep29962>.
- Milhous, R. T. 2012. Application of the Cowell Index to monthly streamflow analysis. *Proceedings AGU Hydrology Days*, Colorado State University, 99–108. Достъпна на адрес: <https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-the-Cowell-Index-to-Monthly-Analysis-Milhous/42ba9a5ea37f8560922aeca88aa016631aac9e82>.
- Mohammed, I. N., A. Bomblies, B. C. Wemple. 2015. The use of CMIP5 data to simulate climate change impacts on flow regime within the Lake Champlain basin. – *Journal of Hydrology*, Reg. Stud., 3, 160–186.
- Sabo, J. L., D. M. Post. 2008. Quantifying periodic, stochastic, and catastrophic environmental variation. – *Ecological Monographs*, 78, 19–40.

- Stearns, S. C. 1981. On measuring fluctuating environments: predictability, constancy, and contingency. – *Ecology* 62, 185–199.
- Stoelzle, M., Schuetz, T., Weiler, M., Stahl, K., and Tallaksen, L. M., 2020. Beyond binary baseflow separation: a delayed-flow index for multiple streamflow contributions, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 849–867, <https://doi.org/10.5194/hess-24-849-2020>.
- Walega A., Mlynski, D. 2017. Seasonality of median monthly discharge in selected Carpathian rivers of the upper Vistula basin. – *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 12, (2), 617–628
- Webb, M., M. Thoms, M. Reid. 2012. Determining the ecohydrological character of aquatic refugia in a dryland river system: the importance of temporal scale. – *Ecohydrolog. Hydrobiol.*, 12, 21–33.
- Zhang, Y., A. Arthington, S. Bunn et al. 2012 Classification of flow regimes for environmental flow assessment in regulated rivers: the Huai River Basin, China. – *River Res. Applicat.*, 28, 989–1005.

SUMMARY
STABILITY AND PREDICTABILITY OF
THE STREAMFLOW OF DEMJANITSA RIVER AT BANSKO

Long time-series of streamflow data are important for the right evaluation of the seasonal fluctuations' sustain and for analyses of multi-annual periodicity. This work aims to assess the long-term fluctuations and the predictability of the streamflow in a high-mountainous drainage basin over 65-year period from 1953–1954 to 2017–2018. The study covers the Demyanitsa River catchment area with an average altitude of 2195 m. The multi-annual variability of streamflow was analyzed by standardization of the annual values and on an integral curve with the ordinate $\sum(Q_i - Q_{av})/C_v$. The probability distribution of the annual and seasonal time-series was carried out by the nonparametric statistical tests and Q-Q plots, and the streamflow predictability by Colwell's indices.

The results showed the following. There is a marked 23-year cycle (between 1981–1982 and 2017–2018) in the multi-annual dynamics of the streamflow of Demyanitsa River. The log-normal distribution model is the best-fit function for the annual and the seasonal flows. There is a very good synchronous of the multi-year fluctuations between the annual and the spring streamflow in the watershed. The ratio between the winter and the spring seasonal streamflow is the same as other investigated periods. The analysis of the monthly streamflow records detected predominance of the moderate outliers compared with extreme outliers. The period with high flows appears every year during May-July or April-June, and the time-series during this period are with small variability ($C_v = 0,27$). The low flows in summer-autumn and winter hydrological season are stable as well ($C_v = 0,30$). The flow of the Demyanitsa River has high predictability ($P = 0,72$) by Colwell's index and confirms the results, received by other methods. Analysis of the historical streamflow data (1953–1954 to 2017–2018) of the Demyanitsa River indicates a stable of the seasonal and multi-annual fluctuations of the streamflow.